

不同防沙措施的风沙流及其携沙粒度垂直分异特征

闫 敏, 左合君, 贾光普, 席 成

(内蒙古农业大学沙漠治理学院/内蒙古自治区风沙物理与防沙治沙工程重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010011)

摘 要: 为揭示不同防沙措施影响下风沙流结构及其携沙粒度变化规律, 采用木质和尼龙网2种材料制作方格沙障、单行沙障、双行沙障与挡沙墙4种防沙措施模型, 利用风洞实验对防沙措施前后风沙流结构进行测定, 并结合 Mastersizer3000 激光粒度分布仪对沙样进行粒度组成分析。结果表明: (1) 不同防沙措施迎风侧风沙流垂直分布与未设置防沙措施时基本相似, 输沙量随高度的增加而减小, 88%以上的输沙量集中在0~10 cm高度层; 而背风侧输沙量随高度表现为先增大后减小的变化规律, 且随着沙障规格的减小、高度的增加、行间距的变窄、孔隙度的降低输沙量集中范围逐渐向上偏移, 输沙量峰值出现的位置由高度较低的透风型方格沙障(7 cm)上移至高度较高的不透风型挡沙墙(26 cm), 且近地表0~10 cm高度层积沙量越少。(2) 受不同防沙措施影响, 不同高度层沙粒粒度特征差异显著, 整体表现出随着高度的增加沙粒的平均粒径逐渐减小的变化规律, 细沙和中沙主要分布在近地表5~25 cm层, 而近地表0~5 cm层则分布有细沙、中沙和粗沙, 峰值出现在0.300 mm附近, 平均含量约为12.09%; 粒度参数变化受防沙措施规格变化影响较小, 更多表现在高度层的差异, 不同防沙措施各高度层沙粒分选性较好、极正偏, 峰度随防沙措施参数的密集化由宽平向中等、尖窄变化, 由方格沙障(0.990)、单行沙障(0.990)、双行沙障(0.996)向挡沙墙(1.086)变化, 且上述变化规律随指示风速的增大逐渐增强。

关 键 词: 风速廓线; 风沙流; 粒度垂直分异; 防沙技术措施

文章编号:

风沙流是指风及其所携带的沙物质组成的气固两相流, 是风沙物理学的核心内容, 研究其变化规律对于风沙防治工程学具有重要的实践指导作用^[1]。不同的防沙措施对荒漠地区固有能量和物质运移规律具有强烈的扰动作用, 通过对近地面流场和地表沙物质运移过程的影响, 造成风沙地貌形态的变异和沙物质的再分选^[2-3]。粒度不仅可以反映风力对沙源物质的搬运能力和分选性质, 也可以记录风沙地貌在形成过程中的风力强度^[4-6]。研究气流搬运的沙粒在不同高度层上的分布规律对于沙粒的运动形式、地表蚀积状况, 掌握风成地貌的形态发育以及演变规律, 在风沙防治工程理论与实践均具有重要价值^[7]。

目前, 关于沙物质粒度特征的研究主要集中于

沙床面沙粒粒度的水平分异和风沙流携沙粒度的垂直分异2个方面, 冯大军等^[8]通过风洞实验研究了沙粒粒度的垂直分布特征, 认为平均粒径在垂直方向上呈指数函数递减分布规律; 王翠等^[9]选取流动沙地和半流动沙地为研究对象, 对其风沙流携沙粒度的垂直分布进行了探究, 结果同样显示沙粒的平均粒径随着高度的上升而逐渐减小。风沙流携沙粒度的分布特征反应了下垫面的风沙环境, 下垫面的环境也会影响到风沙活动的剧烈程度及其释放沙源的潜力^[10]。已有学者通过野外观测得出不同地貌部位的风成沉积物粒度特征也会受到风沙流、沙丘形态、植被以及沉积物等因素的影响^[11-14]; 加之在野外观测时易受地形、天气等因素影响, 如携沙风方向的不确定性, 而使得实验结果具有一定

收稿日期: 2021-12-01; 修订日期: 2022-03-29

基金项目: 内蒙古自然科学基金项目(2021SHZR0524)资助

作者简介: 闫敏(1992-), 男, 博士, 讲师, 主要从事荒漠化防治、交通线路风沙灾害防治等方面的研究。E-mail: ym5233@126.com

通讯作者: 左合君(1971-), 男, 博士, 教授, 主要从事荒漠化防治、道路风沙及风吹雪灾害防治等方面的研究。E-mail: zuohj@126.com

的局限性。随着风洞在风沙运动研究中的广泛应用,很多学者利用风洞模拟实验开展对风沙流结构及其携沙粒度特征的研究^[15-16]。在风洞实验中,多数学者将研究重点放在风沙流粒度垂直分布上,然而对于不同防沙措施、以及不同防沙措施规格参数对风沙流携沙粒度变化规律的影响亟待确定。例如,当指示风速和防沙措施类型一定时,随着防沙措施规格、高度、间距、孔隙度、风向夹角等参数的变化,风沙流垂直分布特征及其携沙粒度又将如何变化?同一防沙措施下指示风速的变化风沙流挟沙粒度又会发生怎样的改变?这使得研究不同防沙措施影响下各高度层输沙量和携沙粒度特征显得尤为重要。目前防治沙害的根本措施还在于通过工程措施或生物措施来抑制或削弱风沙流强度,也只有准确确定了风沙流结构及其影响因素才能有效地制定防治措施。

因此,本文拟在不同指示风速作用下,选择不同规格、高度、行间距、孔隙度等防沙措施为研究对象,通过风洞模拟分析其风速廓线变化规律、风沙流垂直分布及其携沙粒度特征,探讨不同防沙措施

对风沙流及其携沙粒度分布的影响,揭示风沙两相流在垂直方向的分布规律,准确提出影响风沙流及其挟沙粒度分布的规格参数,旨在为荒漠地区合理布设防沙措施、精准治沙提供数据支撑与参考依据。

1 材料与方法

1.1 实验设备

风洞实验在中国科学院西北生态环境资源研究院沙漠与沙漠化重点实验室完成。该风洞为直流闭口吹气式风洞,由动力段、整流段、实验段和扩散段组成,该风洞洞体全长 37.78 m,实验段长度为 16.23 m,截面积为 0.6 m×1.0 m,测量风速范围为 1~40 m·s⁻¹,边界层厚度约为 120 mm,测试过程中通过调速控制组件达到测试的同步性^[17]。

1.2 实验材料及相似性

实验设计既考虑模拟精度,也考虑实验的可操作性,结合雷诺数值确定模型相似比为 1:10,风洞实验模型材料有木质和尼龙网 2 种(图 1)。根据相似性原理,对象流动状态达到紊流状态时,并进入自



图1 风洞实验布设

Fig. 1 Layout of wind tunnel experiment

模化状态,能够满足模型与实物流场分布相似。同一模型在不同雷诺数值时测得的气动性有一定的差别,但当模拟流动的雷诺数值大于临界雷诺数值($3\times10^5\sim1\times10^7$)时,此时的平均风速剖面、湍流度、表面摩擦阻力等边界层流动特征参数与雷诺数的大小无关^[18-19]。因此,本文采用雷诺数值判断风洞气动特性的相似性,以此来确定实验设计模型是否符合要求,实验模型参数及相似性计算结果显示能够满足相似性(表1)。

1.3 实验方法

(1) 模型前后风速廓线测定

在净风条件下测定不同防沙措施的风速廓线,选择 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 4个指示风速梯度,净风稳定后吹刮2 min。风速值利用皮托管压差系统测定值换算而来,测风高度为:0.2 cm、0.5 cm、1 cm、2 cm、4 cm、8 cm、12 cm、16 cm、20 cm和24 cm;测点位置为:模型前——1.5H、2H、4H、8H,模型内部——因防沙措施不同均匀分布观测点,模型后——0.5H、1H、2H、4H、8H、10H、12H、15H,其中,H表示模型的高度,即2H表示距离为2倍的模型高度。

(2) 模型前后风沙流测定

在携沙风条件下测定不同防沙措施的风沙流结构,选择 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 4个指示风速梯度,对应各个指示风速,携沙风稳定后吹刮时间分别为6 min、4 min、2 min、1 min。选用连续等高阶梯式积沙仪测定风沙流,模型迎风侧(-3H)和背风侧(3H)风沙流测点均在3H处,积沙仪高度为30 cm(15层),单一积沙口断面为2 cm×2 cm。

(3) 沙物质粒度分析

采用Udden-Wentworth划分标准确定粒度组分,利用Kumdein算法对其进行对数转化,并将土壤粒径由真数转化为有利于作图和计算的 Φ ;并采用Folk、Ward提出的公式分别对平均粒径、分选系数、

偏度和峰态表征粒度的参数进行计算,公式如下:

$$\Phi = -\log_2 d \tag{1}$$

$$M_z = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}}{3} \tag{2}$$

$$\sigma_1 = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6.6} \tag{3}$$

$$SK = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)} \tag{4}$$

$$K_G = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})} \tag{5}$$

式中: d 为颗粒直径(mm); M_z 为平均粒径; σ_1 为分选系数;SK为偏态值; K_G 为峰态值; Φ_5 、 Φ_{16} 、 Φ_{25} 、 Φ_{50} 、 Φ_{75} 、 Φ_{84} 、 Φ_{95} 表示粒径累积曲线中对应的颗粒直径所转换的 Φ 。

2 结果与分析

2.1 不同防沙措施垂向气流速度廓线特征

不同防沙措施(方格沙障、单行沙障、双行沙障、挡沙墙)迎风侧和背风侧气流速度廓线变化曲线如图2所示,由图可知,在不同指示风速($8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)梯度下,方格沙障(图2a)、单行沙障(图2b)、双行沙障(图2c)以及挡沙墙(图2d)的迎风侧气流速度廓线变化规律基本相似,风速均随着高度的增加而增大。而背风侧受防沙措施的影响较大,对近地表的风速控制作用出现显著差异。其中,不同规格方格沙障对气流速度廓线变化影响较小,更多表现为对近地表(0~5 cm)风速的有效控制,平均较迎风侧风速降低了42.52%,且随着规格的减小,对近地表风速的控制作用更为明显,10 cm×10 cm防风效果最佳。在高立式沙障影响下,背风侧气流变化规律基本同方格沙障相似。单行沙障随着高度的增加,风速降低作用越明显;当沙障叠加为双行沙障时,控制作用明显增强,平均较同一高度单行沙障风速降低了19.66%,同时随

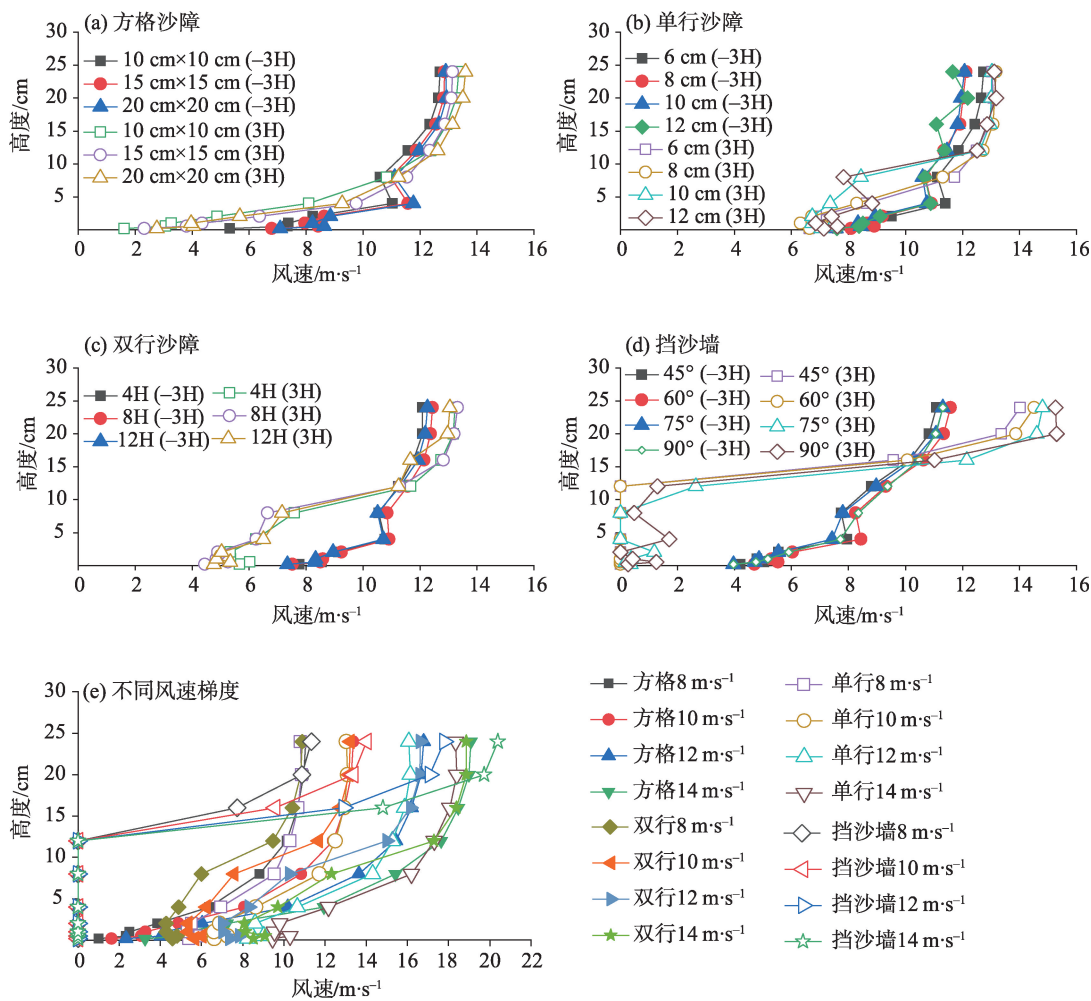
表1 风洞实验模型选择和实验设计依据

Tab. 1 Selection of wind tunnel experimental model and basis of experimental design

序号	防沙措施	高度/cm	规格	行间距	风向夹角/(°)	雷诺数
1	方格沙障	3	10 cm×10 cm、15 cm×15 cm、20 cm×20 cm	—	—	$3.87\times10^5\sim6.78\times10^5$
2	单行沙障	6、8、10、12	—	—	—	$3.84\times10^5\sim6.72\times10^5$
3	双行沙障	10	—	4H、8H、12H	—	$3.84\times10^5\sim6.72\times10^5$
4	挡沙墙	10	—	—	45、60、75、90	$3.87\times10^5\sim6.78\times10^5$

注:H为模型高度;—表示不涉及此项。

chinaXiv:202210.00178v1



注:H表示模型的高度。下同。

图2 不同防沙措施垂向气流速度廓线特征

Fig. 2 Vertical airflow velocity profile characteristics under different sand control measures

着行间距的减小风速减小趋势逐渐增强,4H行间距对风速的影响最大,且近地表(0~5 cm)风速的控制作用表现为方格沙障>双行沙障>单行沙障,近地表(5~12 cm)风速的控制作用表现为双行沙障>单行沙障>方格沙障,而12 cm以上高度的高立式沙障风速表现为抬升作用。当防沙措施为不透风型挡沙墙时,在背风侧0~12 cm高度范围内出现了明显的静风区或弱风区,但对于12 cm高度以上的风速表现为明显的抬升作用,平均较迎风侧增加了17.32%,且随着风向夹角的增加,这种变化规律逐渐增强,90°时达到最大。从各气流速度廓线来看(图2e),除挡沙墙外,不同指示风速作用下迎风侧和背风侧的气流速度廓线变化特征基本相似,仅随着指示风速的增大近地表(0~12 cm)风速降低作用越明显、12 cm以上抬升作用越明显,这也进一步说

明指示风速的变化仅仅反映在气流变化尺度上。

2.2 不同防沙措施风沙流结构特征

在8 m·s⁻¹、10 m·s⁻¹、12 m·s⁻¹和14 m·s⁻¹4个指示风速作用下,不同防沙措施迎风侧和背风侧风沙流结构变化特征如图3所示,由图可知,不同指示风速下,迎风侧风沙流结构变化特征基本相似,近地表输沙主要集中在0~10 cm高度层内,方格沙障、单行沙障、双行沙障和挡沙墙4种防沙措施迎风侧0~10 cm的输沙量分别占总输沙量的87.32%、89.04%、91.82%、84.63%;但不同防沙措施对迎风侧总输沙通量的影响有差异,整体表现为双行沙障(16.19 g·m⁻¹·s⁻¹)>方格沙障(14.90 g·m⁻¹·s⁻¹)>单行沙障(14.44 g·m⁻¹·s⁻¹)>挡沙墙(3.07 g·m⁻¹·s⁻¹)。受防沙措施的影响,背风侧输沙量随着高度的变化规律不再遵循风沙流结构定律,表现为近地表0~10 cm范

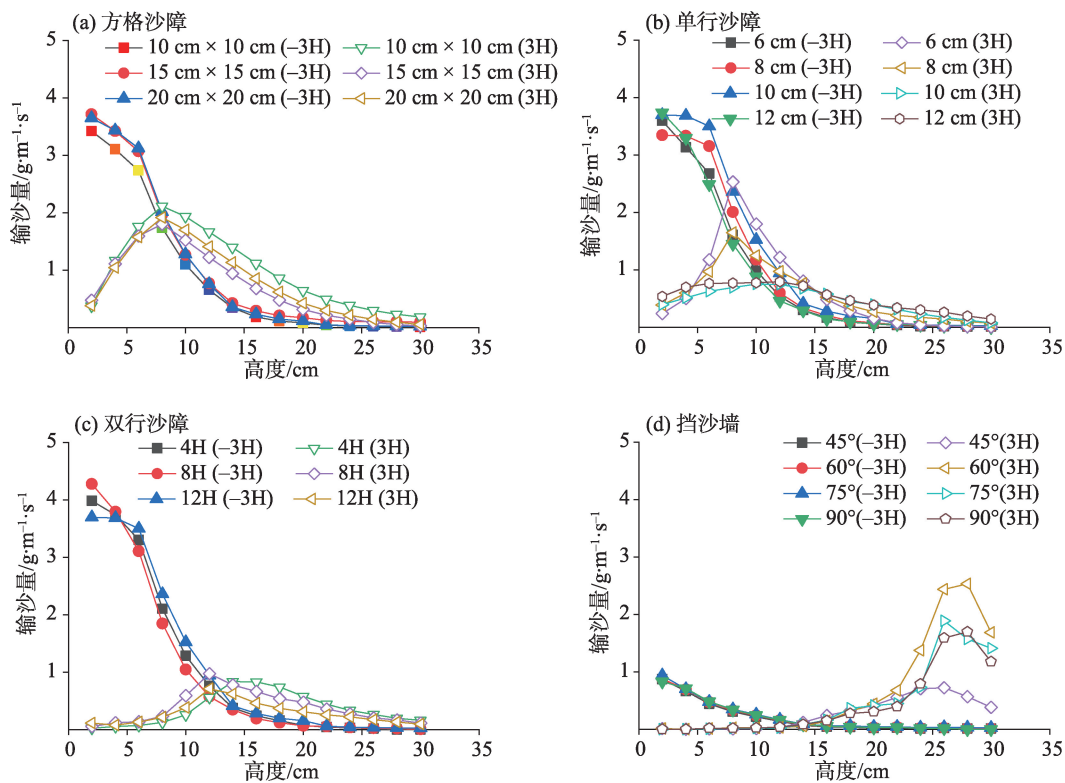


图3 不同防沙措施风沙流结构变化特征

Fig. 3 Variation characteristics of wind-sand flow structure under different sand control measures

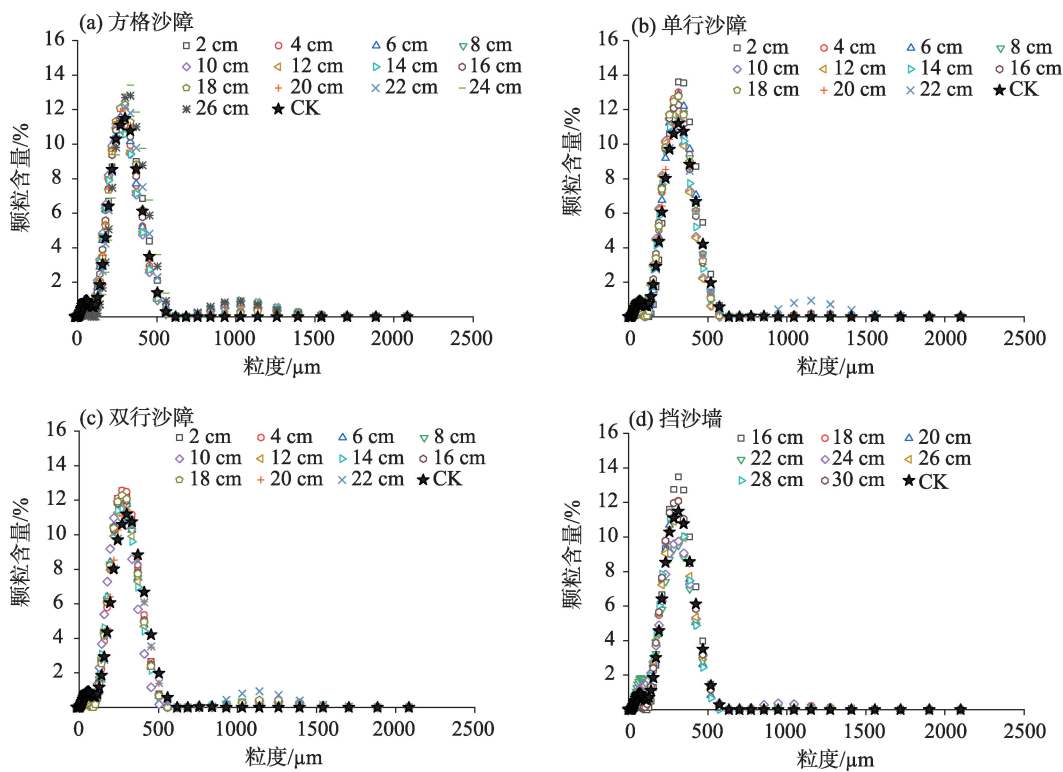
围内输沙量随高度逐渐增加,10~30 cm输沙量逐渐减少;且因防沙措施规格、高度、行间距、孔隙度等参数的影响,输沙量峰值出现的位置及含量差异显著,整体表现为沙障规格越大、高度越低、行间距越大输沙量峰值也越大,其中双行沙障对输沙的影响最大,峰值最小,方格沙障次之,而单行沙障对背风侧输沙量的影响较小。当防沙措施为不透风型挡沙墙时,背风侧近地表(0~15 cm)输沙量几乎为0,由于挡沙墙对风力的抬升作用,使得更多的沙粒被吹蚀到15~30 cm范围内,且主要集中在20~30 cm高度层,约占总输沙量的90.28%。同时分别采用指数、对数、幂函数、正太分布等模型对风沙流通量进行拟合,迎风侧输沙通量随高度的变化呈显著的指数函数变化规律(决定系数 $R^2>0.9$),而背风侧受不同防沙措施的影响,呈现出高斯函数分布模型,也因防沙措施类型、规格的不同函数系数及拟合结果有一定的差异,但整体效果较好。不同防沙措施迎风侧和背风侧风沙流变化规律基本不受指示风速的影响,但随着指示风速的增大,每层平均输沙量显著增加,且这种作用过程逐渐增强,同样说明指示风速的变化仅仅反映在输沙变化尺度上。

2.3 风沙流携沙粒度频率分布特征

由不同防沙措施的风沙流携沙粒粒度频率分布曲线(图4)可知,实验沙样粒径范围为0.001~1.000 mm(CK),且主要分布范围为0.100~1.000 mm,以细沙(0.125~0.250 mm)和中沙(0.250~0.500 mm)为主,峰值出现在0.300 mm附近。不同防沙措施风沙流中各高度层粒度频率分布曲线形状基本相似,均表现为单峰分布特征,但受不同防沙措施的影响,不同防沙措施各高度层峰值出现位置略有差异(0.250~0.350 mm),且峰值含量也不相同,多数峰值含量介于9%~14%。随着高度的增加,沙粒粒度频率分布曲线有向右上偏移趋势,但不管防沙措施规格、高度、行间距、风向夹角如何变化,对不同高度层的颗粒物频率分布规律影响较小,只是对曲线峰值出现的位置及含量有所影响,且随着指示风速的增大有增强趋势,这符合沙粒在风沙运动过程中垂直分布特征,由此也可以证明,在指示风速一定的条件下,风沙流中沙粒粒度分布随高度的变化受防沙措施参数影响较小。

2.4 风沙流携沙粒度参数空间变化特征

同一指示风速作用下不同防沙措施风沙流中



注:CK表示无措施。

图4 不同防沙措施风沙流携沙粒粒度频率分布曲线

Fig. 4 Requery distribution curves of grain in wind-sand flow structure under different sand control measures

沙粒粒度参数(平均粒径、分选系数、偏度与峰态)的空间变化特征如图5所示,由图可知,不同防沙措施在近地表0~30 cm高度范围内风沙流携沙颗粒物粒度随高度的增加呈逐渐变细的趋势,平均粒径在垂向变化上表现为0~8 cm高度层逐渐变细,8~20 cm高度层逐渐趋于稳定,部分高度层平均粒径有所波动,但整体在向细的方向发展。且不同防沙措施的平均粒径曲线基本相似,整体表现为:随着沙障规格的减小、高度的增加、行间距的变窄沙物质颗粒平均粒径逐渐减小。不同防沙措施风沙流中沙粒的分选系数均在0.300~1.000,平均值分别为挡沙墙(0.595)>方格沙障(0.532)>单行沙障(0.500)>双行沙障(0.466),可以看出挡沙墙对其影响最大;而在20~25 cm范围内分选性降为中等(0.710~1.000),分选系数随着高度的上升呈现为先增大后减小然后逐步趋于平缓的变化趋势,其中挡沙墙影响下波动较大,但也符合上述变化规律,其余防沙措施影响下分选系数随高度的变化曲线基本相似。从方格沙障、单行沙障、双行沙障到挡沙墙,风沙流颗粒物粒度的偏态值随着高度的增加趋于增大趋势,4

种防沙措施风沙流中沙粒的偏度系数分布范围呈现近对称-正偏-极正偏的变化规律,表明平均值向中位数较细的方向移动,平均粒径变小,这符合平均粒径在不同防沙措施影响下的变化规律。锋态主要有宽平-中等-尖窄3种,其中,方格沙障锋度值变化范围为0.887~1.209,平均值为1.035;单行沙障锋度值变化范围为0.891~1.189,平均值为0.990;双行沙障锋度值变化范围为0.901~1.150,平均值为0.996;而挡沙墙锋度值变化范围为0.897~1.413,平均值为1.086。

3 讨论

风沙运动是沙物质贴近地面的搬运过程,采取不同防沙措施来改变近地层的气流及风沙流运动能够有效削弱风沙活动的强度。已有研究表明,风沙流受障碍物阻挡后,其运动能力开始下降,在其迎风侧与背风侧一定范围内造成挟沙颗粒的跌落、沉降,从而影响不同位置输沙量,导致风沙流结构与障碍物周围积沙发生变化^[20-22]。本研究通过对透风型方格沙障、单行沙障、双行沙障和不透风型挡

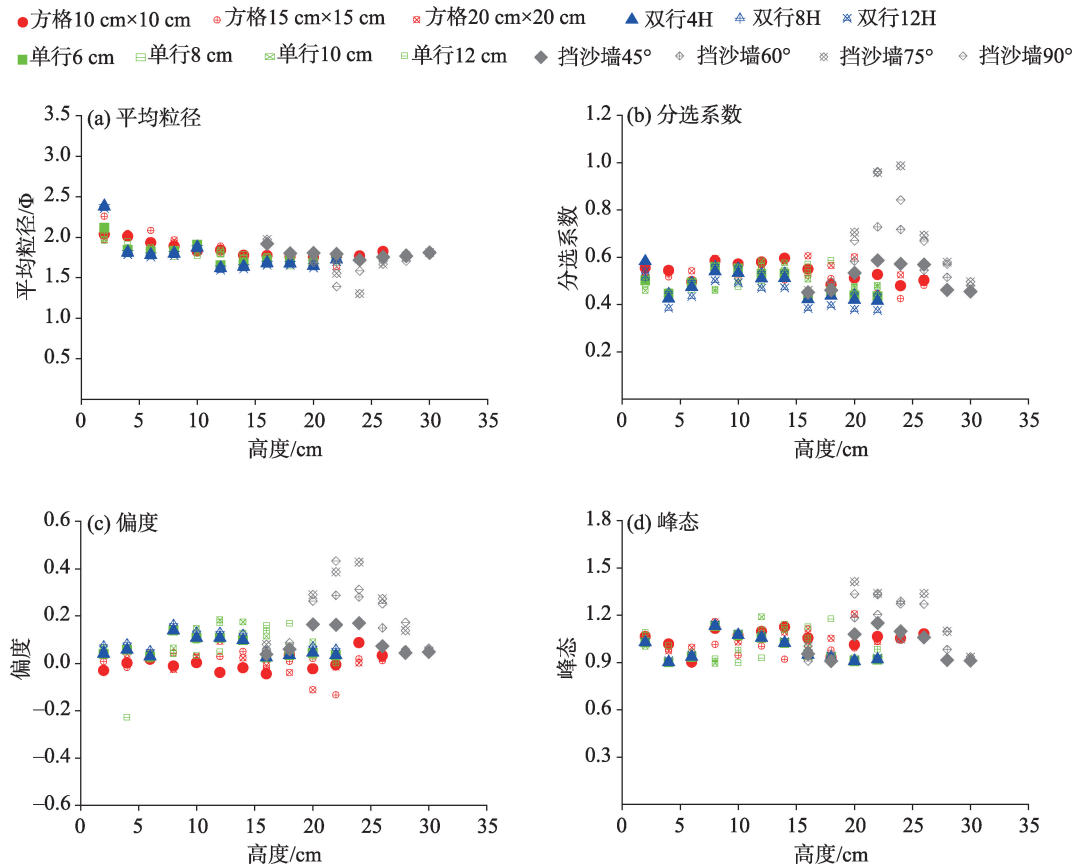


图5 不同防沙措施风沙流中粒度参数空间分布特征

Fig. 5 Spatial distribution characteristics of grain size parameters in wind-sand flow under different sand control measures

沙墙前后风沙流垂直分布特征的分析,得出其迎风侧风沙流结构与未设置防沙措施时基本相似,输沙量仍随着垂向高度的增加而减少,这符合 Bagnold 风沙流垂直分布规律^[23]。而受不同防沙措施的影响,背风侧不再遵循风沙流结构定律。影响风沙流结构特征的因素较多,主要受下垫面状况、植被因素、土壤因素以及风沙环境等影响^[24-27],因此导致拟合函数存在一定差异。本文为尽可能控制参数变量,选择风洞实验,考虑指示风速和防沙措施参数本身带来的影响,结果显示因防沙措施的不同输沙总量及各层变化差异显著,整体呈现出防沙措施规格越小(密度越大)、高度越高、行间距越窄、孔隙度越小、风向夹角越接近 90°,输沙总量越少的变化规律,且随防沙措施规格越小、高度越高、行间距越窄、孔隙度越小、风向夹角越接近 90°,输沙量的峰值越向上移动,近地表 0~10 cm 高度层积沙量也越少;而在不透风型挡沙墙措施影响下,背风侧近地表 0~10 cm 高度层积沙量几乎为 0,且指示风速的变化仅仅反映在输沙变化尺度上。同时也采用指数、

对数、幂函数、正太分布等模型对风沙流通量进行拟合,筛选了最佳拟合模型,发现迎风侧输沙通量随高度的变化呈显著的指数函数变化规律,这与沙漠中近地层 1 m 范围内的风沙流通量可以用指数函数表示,该研究结果与张正偲等^[28]的研究结果相似;本文也进一步分析了不同防沙措施影响下背风侧输沙通量的变化规律,结果显示受防沙措施类型规格的影响,输沙通量随高度呈现出高斯函数分布模型,也因防沙措施类型、规格的不同函数系数及拟合结果有一定的差异。

同样,粒度作为反映风力对沙源物质的搬运能力和分选性质的重要指标^[29],在不同防沙措施影响下,在垂直高度上也出现了一定程度的分异现象。如王翠等^[9]对流动、半流动沙地上风沙流携沙粒度的垂直分布特征研究时发现,沙粒的平均粒径随高度的增加而减小;冯大军等^[16]也通过风洞模拟证明了沙粒粒度的平均粒径在垂直方向和水平方向上均呈指数递减;且在非均匀床面上各粒径段沙粒的起跳率并不相同,粗颗粒沙粒的起跳率大于细沙

粒,粗颗粒沙粒对细沙粒有一定的遮挡作用,而在6~8 cm高度层以上时,粗砂颗粒受跃移高度的限制,含量逐渐减小,而细砂含量逐渐开始增加;黎小娟等^[5,30]在对尼龙网方格沙障中风沙流挟沙粒度的空间分异特征中发现,在方格沙障后风沙流中平均粒径减小、分选性变差、偏度增大、峰态值减小。本文研究结果也验证了上述结论,并进一步探讨了不同防沙措施参数对这种分布规律的影响,如防沙措施的规格、高度、行间距、孔隙度、风向夹角等参数,并从平均粒径、分选系数、偏度、峰态等参数进行了分析,研究结果表明:不同防沙措施风沙流中粒度特征随高度的增加平均粒径逐渐减小,中高层(5~25 cm)主要由中沙组成,而近地表层(0~5 cm)分布有细沙、中沙和粗沙;平均粒径在垂向变化上表现为0~8 cm高度层逐渐变细,8~20 cm高度层逐渐趋于稳定,不同防沙措施各高度层沙粒分选性较好、极正偏,峰度随防沙措施参数的密集化由宽平状态向中等、尖窄状态变化;粒度参数变化受防沙措施规格变化影响较小,更多表现为在高度层的差异;且上述规律变化程度随指示风速的增大逐渐增强。

4 结论

本文采用风洞模拟方法对不同防沙措施的风沙流及其携沙粒度垂直分布特征进行了详细解析,主要得到如下结论:

(1) 不同防沙措施迎风侧输沙量均随高度的增加而减小,符合指数函数模型,输沙量主要集中在0~10 cm高度层,约占总输沙量的88.20%,而背风侧表现为先增大后减小的变化趋势,呈高斯函数分布规律。随着防沙措施规格的减小、高度的增加、行间距的变窄、孔隙度的降低,输沙量集中范围逐渐向上偏移,峰值出现的位置由高度较低,的方格透风型沙障(7 cm)上移至高度较高的不透风型挡沙墙(26 cm);且近地表0~10 cm高度层积沙量越少,在不透风型挡沙墙措施影响下,背风侧近地表0~10 cm高度层积沙量几乎为0,上述变化规律随指示风速的增大而逐渐增强。

(2) 不同防沙措施风沙流中粒度特征随高度的增加平均粒径逐渐减小,中沙主要分布在近地表(5~25 cm),而近地表(0~5 cm)层粒度分布范围更广(0.100~1.000 mm),粒度参数变化受防沙措施规格

变化影响较小,更多表现为在高度层的差异,不同防沙措施对风沙流中不同高度层粒度参数的影响随指示风速的增大、规格参数的密集化影响程度显著增强。

参考文献(References)

- [1] Zhang P, Sherman D J, Li B L. Aeolian creep transport: A review [J]. *Aeolian Research*, 2021, 51: 100711, doi: 10.1016/j.aeolia.2021.100711.
- [2] 马倩, 武胜利, 刘永泉, 等. 艾比湖流域抛物线沙丘表层沉积物粒度特征[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(3): 650–657. [Ma Qian, Wu Shengli, Liu Yongquan, et al. Grain size distribution of the parabolic dunes' sediments in the Ebinur Lake Basin, Xinjiang, China [J]. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(3): 650–657.]
- [3] 沈亚萍, 张春来, 李庆, 等. 中国东部沙区表层沉积物粒度特征[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(1): 150–157. [Shen Yaping, Zhang Chunlai, Li Qing, et al. Grain-size characteristics of surface sediments in the eastern desert regions of China[J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(1): 150–157.]
- [4] 王佩, 马倩, 朱元璞, 等. 新疆图开沙漠灌丛沙堆和抛物线形沙丘表层沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. *干旱区地理*, 2021, 44(6): 1644–1653. [Wang Pei, Ma Qian, Zhu Yuanpu, et al. Grain size characteristics and sedimentary environment of surface sediments from nebkhas and parabolic dunes in the Tukai Desert, Xinjiang[J]. *Arid Land Geography*, 2021, 44(6): 1644–1653.]
- [5] 黎小娟, 李宁, 周智彬, 等. 尼龙网方格沙障的风沙流颗粒分布特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 128–134. [Li Xiaojuan, Li Ning, Zhou Zhibin, et al. Characteristic of sand flux structure and sand particle size distribution based on nylon checkerboard barrier [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(5): 128–134.]
- [6] Hossein K, Mahmoodabadi M, Jalali V, et al. Sediment flux, wind erosion and net erosion influenced by soil bed length wind velocity and aggregate size distribution[J]. *Geoderma*, 2018, 323: 22–30.
- [7] 落桑曲加, 张焱, 马鹏飞, 等. 雅鲁藏布江中游不同地表输沙量特征[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(2): 6–13. [Luosangqujia, Zhang Yan, Ma Pengfei, et al. Study on the sand transport quantities on the different landscapes in the middle area of Yarlung Zangbo River[J]. *Journal of Desert Research*, 2022, 42(2): 6–13.]
- [8] 冯大军, 倪晋仁, 李振山. 风沙流中不同粒径组沙粒的输沙量垂向分布实验研究[J]. *地理学报*, 2007, 62(11): 1194–1203. [Feng Dajun, Ni Jinren, Li Zhenshan. Vertical mass flux profiles of different grain size groups in aeolian sand transport[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(11): 1194–1203.]
- [9] 王翠, 雷加强, 李生宇, 等. 策勒绿洲-沙漠过渡带风沙流挟沙粒度的垂直分异[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(2): 230–238. [Wang Cui, Lei Jiaqiang, Li Shengyu, et al. Vertical distribution of grain size in aeolian flow in Cele oasis-desert ecotone[J]. *Arid Land Ge-*

- ography, 2014, 37(2): 230–238.]
- [10] 杨转玲, 钱广强, 董治宝, 等. 库姆塔格沙漠北部三垄沙地区风成沉积物粒度特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(3): 589–596. [Yang Zhuanling, Qian Guangqiang, Dong Zhibao, et al. Grain size characteristics of the aeolian sediments from Sanlongsha area of the northern Kumtagh Desert[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(3): 589–596.]
- [11] 孔丹, 何清, 张瑞军, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴过程贴地层梯度输沙样粒度特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(1): 49–53. [Kong Dan, He Qing, Zhang Ruijun, et al. Characteristics of grain sizes for samples of different grades of transporting sediment in the ground layer during the course of sandstorms in the hinterland of the Taklimakan Desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(1): 49–53.]
- [12] 董玉祥, 马骏. 风速对海岸风沙流中不同粒径沙粒垂向分布的影响[J]. 中山大学学报, 2008, 47(5): 98–103. [Dong Yuxiang, Ma Jun. Influence of wind velocity on the vertical distribution of different grain size sands in the wind-sand flow on the coastal dune[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2008, 47(5): 98–103.]
- [13] 董玉祥, 马骏. 输沙量对海岸沙丘表面风沙流中不同粒径沙粒垂向分布的影响[J]. 中山大学学报, 2009, 48(3): 102–108. [Dong Yuxiang, Ma Jun. Influence of total sand transport rates on the vertical distribution of different sand grain sizes in wind-sand flow on the coastal dune[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2009, 48(3): 102–108.]
- [14] Miri A, Dragovich D, Dong Z B. Wind-borne sand mass flux in vegetated surfaces-wind tunnel experiments with live plants[J]. Catena, 2019, 172: 42–434.
- [15] Dong Z B, Liu X P, Wang H T, et al. The flux profile of a blowing sand cloud: A wind tunnel investigation[J]. Geomorphology, 2002, 49: 219–230.
- [16] 冯大军, 倪晋仁, 李振山. 风沙流中沙粒粒度的垂直和水平分布特征[J]. 泥沙研究, 2008(5): 22–30. [Feng Dajun, Ni Jinren, Li Zhenshan. Vertical and horizontal profiles of grain size in aeolian sand transport[J]. Journal of Sediment Research, 2008(5): 22–30.]
- [17] 闫敏. 乌兰布和沙漠防沙技术措施复合作用机制及其优化配置[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020. [Yan Min. Combined action mechanism of Ulan Buh Desert sand prevention technology measures and its optimal configuration[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agriculture University, 2020.]
- [18] Liu H Y, Hou Z F, Chen Z, et al. Effects of standing stubble on the interception of soil erosion particles[J]. Land Degradation & Development, 2019, 30(3): 328–336.
- [19] 闫敏, 左合君, 郭跃, 等. 风沙环境下防风挡沙墙复变作用规律的风洞模拟[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(5): 108–117. [Yan Min, Zuo Hejun, Guo Yue, et al. Wind tunnel simulation of complex deformation law on retaining wall under aeolian sand environment [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(5): 108–117.]
- [20] 屈建军, 黄宁, 拓万全, 等. 戈壁风沙流结构特性及其意义[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 19–23. [Qu Jianjun, Huang Ning, Ta Wanquan, et al. Structural characteristics of gobi sand-drift and its significance[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(1): 19–23.]
- [21] Zhang Z C, Dong Z B, Qian G Q. Field observations of the vertical distribution of sand transport characteristics over fine, medium and coarse sand surfaces[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2017, 42(6): 889–902.
- [22] 张克存, 屈建军, 俎瑞平, 等. 不同下垫面对风沙流特性影响的风洞模拟研究[J]. 干旱区地理, 2004, 27(3): 352–355. [Zhang Kecun, Qu Jianjun, Zu Ruiping, et al. Wind tunnel simulation about the effects of the different underlying surfaces on the features of drifting sand current[J]. Arid Land Geography, 2004, 27(3): 352–355.]
- [23] Bagnold R A. The physics of blown sand and desert dunes[M]. New York: Methuen, 1941.
- [24] 韩致文, 缙倩倩, 杜鹤强, 等. 新月形沙丘表面 100 cm 高度内风沙流输沙量垂直分布函数分段拟合[J]. 地理科学, 2012, 3(7): 892–897. [Han Zhiwen, Gou Qianqian, Du Heqiang, et al. The piecewise fitting of sand flux vertical distribution of wind-sand flow within 100-cm height above the barchan dune surface[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 3(7): 892–897.]
- [25] Kang L Q, Zou X Y. Experimental investigation of mass flux and transport rate of different size particles in mixed sand transport by wind[J]. Geomorphology, 2020, 367: 107320, doi: 10.1016/j.geomorph.2020.107320.
- [26] Zhang Z C, Han L Y, Pan K J. Sediment transport characteristics above a gobi surface in northwestern China, and implications for aeolian environments[J]. Aeolian Research, 2021, 53: 100745, doi: org/10.1016/j.aeolia.2021.100745.
- [27] 郭树江, 杨自辉, 王强强, 等. 青土湖干涸湖底风沙流结构及输沙粒径特征[J]. 生态学杂志, 2021, 40(4): 1166–1176. [Guo Shu-jiang, Yang Zihui, Wang Qiangqiang, et al. The structure and grain size of wind-sand flow in the dry bottom of Qingtu Lake[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(4): 1166–1176.]
- [28] 张正德, 董治宝. 腾格里沙漠东南部野外风沙流观测[J]. 中国沙漠, 2013, 33(4): 973–980. [Zhang Zhengcai, Dong Zhibao. Field observation of aeolian sediment flux in the southeast Tengger Desert[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(4): 973–980.]
- [29] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1957, 27(1): 3–26.
- [30] 黎小娟, 周智彬, 李宁, 等. 尼龙网方格沙障风沙流携沙粒度的空间分异特征[J]. 中国沙漠, 2018, 38(1): 76–84. [Li Xiaojuan, Zhou Zhibin, Li Ning, et al. Spatial distribution of grain size in aeolian flow in nylon net checkerboard barrier[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(1): 76–84.]

Vertical distribution characteristics of wind-sand flow and its grain size under different sand control measures

YAN Min, ZUO Hejun, JIA Guangpu, XI Cheng

(College of Desert Control Science and Engineering/Inner Mongolia Key Laboratory of Aeolian Physics and Desertification Control Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010011, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to reveal the characteristics of wind-sand flow and sand-carrying grain size, four types of sand control measures were implemented: checkered sand barriers, single- and double-row sand barriers, and retaining walls made of wood and nylon net. Wind tunnel experiments were carried out at Key Laboratory Desert and Desertification, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou City, Gansu Province, China to measure the aeolian flow before and after intervention, and the particle size composition of sand samples was analyzed using a Mastersizer3000 laser particle size distributor. The results show that: (1) the vertical distribution of wind-sand flow with the use of various measures was similar to observations made prior to intervention. Sediment transport increased with increases in height, and more than 88% of the sediment transport was concentrated within the 0–10 cm height layer. Also, leeward side with high-sediment discharge performance first increased and then decreased. It also increased with a decrease in the barrier size, height, line spacing of the narrowing, and porosity, and gradually reduced the upward migration of the sediment discharge concentration. Furthermore, the peak value of sediment transport shifted from the relatively low barrier-type drafty squares (7 cm), upward to the relatively high tight sand retaining wall (26 cm). Moreover, the sediment deposition of the 0–10 cm layer near the surface was less. (2) Affected by the various sand prevention measures, significant differences were found in various levels of sand grain size characteristics and the overall average particle size of sand showed decreases with the increase in height, the change rule of fine sand and sand was mainly distributed in the near surface 5–25 cm layer. Meanwhile, the near surface layer 0–5 cm distribution of fine sand, medium sand, and coarse sand, had a peak value of about 0.300 mm, and the average content was about 12.09%. Smaller grain size parameters were affected by the measured specification changes; the kurtosis changes from wide and flat to medium and narrow with the densification of measured parameters; the change from checkered sand barrier (0.990), single-row sand barrier (0.990), double-row sand barrier (0.996) to sand retaining wall (1.086); and the above change law gradually increased with the increase in indicated wind speed.

Key words: wind profile; wind-sand flow; vertical distribution of grain size; sand prevention technology measures